

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫДАВЛИВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ AL-CU ЧЕРЕЗ УГЛОВОЙ КАНАЛ

MODELLING OF ECAE PROCESS OF AL-CU BIMETALLIC CHARGE

Дзя Генрих Иосифович, Берски Шимон Григорьевич, Сехман Катажина Станиславовна
Ченстоховский технологический университет

Институт обработки металлов давлением и инженерии безопасности

Ал. Армии Крайовой 19, 42-200 Ченстохова, Польша

e-mail: ksechman@wip.pcz.pl

Abstract

In the work the analysis of stress intensity and normal stresses existing into the round bimetal rod extruded through the angle channel were analysed. The aim of the research was an assessment of usability ECAE process to joining bimetal layers. FEM modelling was verified by laboratory tests.

Содержание

В настоящей работе представлено анализ нормальных напряжений и интенсивности напряжений в биметаллической заготовке, в круглом сечении, во время процесса выдавливания через угловой канал, для матриц с разными углами φ . Цель этих исследований заключалась в оценке пригодности процесса РКУ для соединения слоев. Модельные исследования МКЭ проверено во время лабораторных исследований.

В случае биметаллических проволок и прутков, для которых характерным является плакирующий слой исполненный из меди и стержня из алюминия, применяется электропроводность меди и небольшой вес алюминия. Биметаллы Al/Cu широко применяются в разных отраслях промышленности, главным образом в электротехнике, электронике и телекоммуникации.

В литературе описано несколько методов соединения металлов в биметалл, позволяющих на хорошее соединение слоев [1]. Новый метод, предложенный авторами работы [2] заключается в применении процесса выдавливания металла через угловой канал (РКУ) с целью соединения металлы в биметалл. Согласно автором работы [3] механизм прочного соединения в этом процессе произошёл во время нескольких этапов. В первом этапе имело место растягивание слоев биметалла, которое вызвало возникновение поперечных трещин приповерхностных слоев, предварительно упрочненных во время подготовительных операций. Трещины приводят к открытию чистого металла и вследствие влияния большого давления между слоями (выступающего вследствие кинематики процесса выдавливания) приводят к приближении до атомного расстояния. Из этого следует, что для соединения выдавливаемых металлы следует правильно растягивать соединяемые слои, до момента возникновения микротрещин и привести к большому единичному давлению между соединяемыми слоями.

В работе [3] анализировано пригодность процесса РКУ холодным способом, для соединения слоев биметалла путем применения матриц имеющих разные формы калибров. В анализе применено классический подход А. Valieva [4] для определения геометрий углового канала, определенной углом ψ между осями каналов и угол округлости внешнего края проникания каналов ψ . Авторы обнаружили что, чем меньше угол между осями каналов φ (диапазон анализа охватывал углы от 90° до 135°) и меньше угол округлости ψ (диапазон от 0° до 45°), тем большую прочность соединения можно получить во время процесса.

В настоящей статье авторы предложили изменение геометрии зоны деформации путем определения двух независимых радиусов округлости (внешнего и внутренней угловой части зоны проникания каналов матрицы r и R представленных на рис. 1). Причиной такого подхода была большая асимметрия процесса РКУ, которая вызывает неравномерную деформацию заготовки и меньше подобие до чистого срезывания. Чтобы увеличить влияние срезывающих напряжений и достигнут большую их однородность в осевом сечении, в плоскости распределения матриц применено округлость грани внешней угловой части матрицы при помощи радиуса R , а не при помощи радиуса вытекающего из угла округлости $R(\psi)$, что приводит к сужению зоны деформации и одновременно элиминирует возникновение мертвой зоны во внешней угловой части, особенно при больших коэффициентах трения между заготовкой и инструментом. Зато цель внутренней округлости угловой части матрицы, введенной при помощи радиуса $r=2$ мм, заключалась в уменьшении продольных напряжений растягивающих, выступающих на поверхности стыка плакирующего слоя и инструмента (возможность возникновения трещин упрочненного и тонкого слоя плакира в этой зоне) и в избеганию сплющивании (овализация) заготовки после входа в горизонтальный канал.

Номерные исследования заключались в проведении компьютерных симуляций процесса РКУ при помощи программы Forge®2008 [5], опирающейся на МКЭ. Геометрические модели заготовок и инструментов были исполнены в графической программе AutoCAD2009®. Размещение инструментов и заготовки имело плоскость симметрии вдоль оси каналов в матрицы. Чтобы сократить время расчетов, симуляцию проведено для $\frac{1}{2}$ помещения. Исследования проведено для заготовки диаметром $D=22$ мм и высотой $H=100$ мм.

В исследованиях анализировано деформацию заготовки составленной из биметалла таким образом, что стержень из алюминия был размещенный „без свободного места” в втулке из меди имеющей дно, толщина втулки составляла $t_1=1$. Во время номерных исследований, в температуре окружности, применено реологические модели материалов из базы данных программы Forge2008®. Представителем плакирующего слоя заготовки была медь из класса

Cu-ETP, зато стержень отвечал свойствам алюминия из класса EN AW-1050A. Отдельные слое описано сеткой четырехстенных конечных элементов. Чтобы получить большую точность расчетов в зоне самых больших пластических деформации, то есть в зоне проникания каналов инструментов, величина элементов сетки была в два раза меньше чем в остальной части образца.

Процесс проведено в температуре окружности, при постоянной скорости подачи штампе $v=5$ мм/с. Во время исследований применено два типа матриц, которых форма и размеры представлено на рис. 2. В модельных исследованиях прямо коэффициент трения в месте стыка материала заготовки с инструментами $\mu=0,05$; зато между плакирующим слоем и стержнем, коэффициент трения составлял $\mu=0,2$, - определены из кольцевого испытания Burgdorfа.

В номерных исследованиях применено модель опирающуюся на трехмерном состоянии деформации и упругопластической модели деформации заготовки.

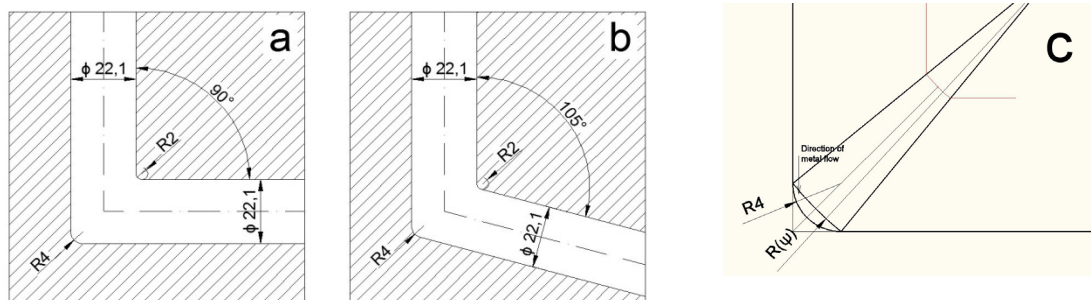


Рис. 1 Матрицы использованы во время исследований: а) $\varphi = 90^\circ$, б) $\psi = 105^\circ$, в) различие в направлениях течения металла в зоне деформации при использовании округлости вытекающей из угла ψ - вытекающей из округления при помощи радиуса R .

В исследованиях применено округлости внешней угловой части $R=4$ мм и внутреннего $r=2$ мм. Радиус округлости внешней угловой части матрицы гарантирует избежание тресканию тонкого слоя плакирующего и элиминирует явление отхождения слоя плакира от поверхности инструмента (овализация сечения заготовки).

Зато радиус округлости $R=4$ мм позволяет получить большие напряжения срезающие в сравнении с применением радиуса вытекающей из такого же угла округления (рис. 1с). Металл во внешнем слое течет намного дольше, чем при стене канала, чтобы в зоне округлости изменить направление течения на горизонтальный, что приводит к возникновению больших напряжений срезающих при грани канала.

В результате номерных исследований получено распределение нормальных напряжений на поверхности плакирующего слоя стержня, интенсивности напряжений и максимальных контактных напряжений в продольном сечении заготовки деформируемой в матрицах $\varphi = 90^\circ$, б) $\varphi = 105^\circ$, которых характеристические размеры представлено на рис. 1.

На первом этапе деформации в матрицах под углом наклона $\varphi = 105^\circ$, самое большое напряжение выступает в месте где слой стержня находится в контакте с дном горизонтального канала, тогда практически целое давление штампе будет направлено в эту зону. На этом этапе большая интенсивность напряжений появляется также в зоне внутренней угловой части, что вызвано внезапным изменением направления течения металла, которого головная часть перемещается в сторону горизонтального канала (рис. 2а). Для этого этапа характерным является неуставленный характер течения слоев, слое приспособляются к зоне деформации. В связи с меньшей пластичностью плакира, можно наблюдать отслоение слоя плакира от стержня в области внешней угловой части матрицы головной части заготовки (рис. 2а). На втором этапе формируется зона пластического течения, которая в связи с низким коэффициентом трения, является несимметричной и передвинутой в сторону горизонтального канала. На этом этапе самая большая интенсивность напряжений выступает в плакирующем слое, в области внутренней угловой части матрицы, потому что в этом месте появляются самые большие растягивающие напряжения вдоль

направления течения металла. В зоне деформации можно наблюдать невосполнение внешней угловой части матрицы металлом, которое имеет место до конца процесса (рис. 2b). На последнем этапе характер течения слоев в зоне пластической деформации изменяется. Зато значения напряжений

подлежат унифицированию вдоль сечения горизонтального канала, самые большие значения выступают в нижнем слое плакира, где напряжения равномерно размещены вдоль этого слоя, а самые маленькие значения выступают на оси стержня (рис. 2c).

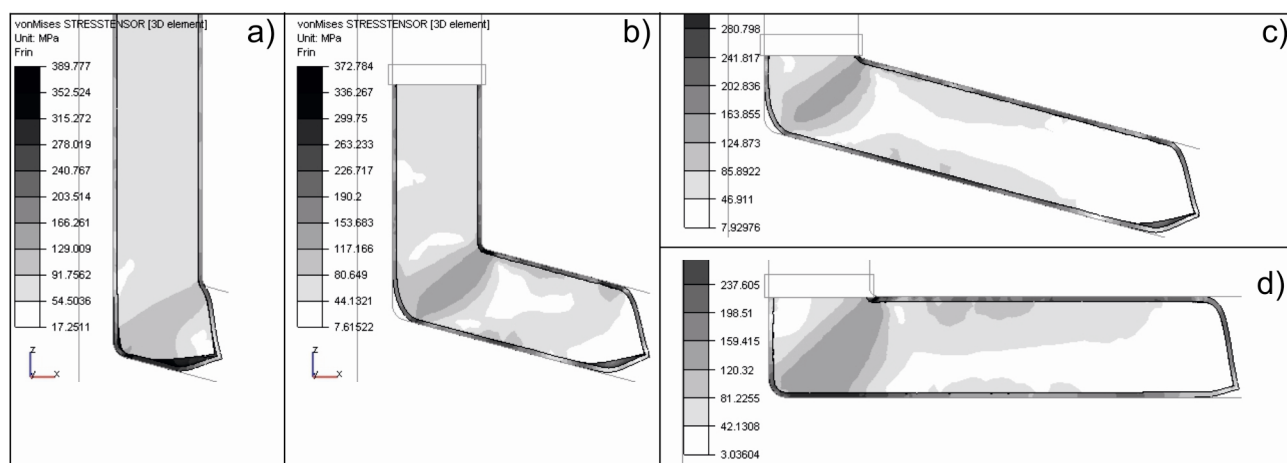


Рис. 2 Интенсивность напряжений для биметалла деформируемого в матрицы под углом $\varphi = 90^\circ$: а) I этап (начальный), б) II этап (установленное течение), с) III этап (конечный); и для матрицы под углом $\varphi = 105^\circ$: d) III этап

Во время выдавливания биметалла в матрице под углом наклона $\varphi = 90^\circ$ можно заметить общее увеличение напряжений по отношению к матрице под углом наклона 105° , во всем сечении, во всех этапах процесса, что очевидно в связи с большой степенью деформации заготовки. Только на первом этапе процесса, в матрице $\varphi = 105^\circ$ выступает значительная концентрация напряжений на дне канала, их максимальные значения немного больше, чем для матрицы 90° , для которой напряжения равномерно размещены вдоль стены горизонтального канала. В связи с равномерно размещенными напряжениями в этой зоне и общим

увеличением силы выдавливания, не наблюдается расслоения в головной части заготовки. После входа обоих слоев в горизонтальный канал, имеет место установленное течение, где самые большие напряжения выступают в зоне проникновения каналов, в плакирующем слое, особенно во внутренней угловой части и при нижней стене горизонтального канала (рис. 2d)

С точки зрения возможности соединения слоев во время процесса РКУ существенным фактором является размещение нормальных напряжений на грани слоя во время всего процесса.

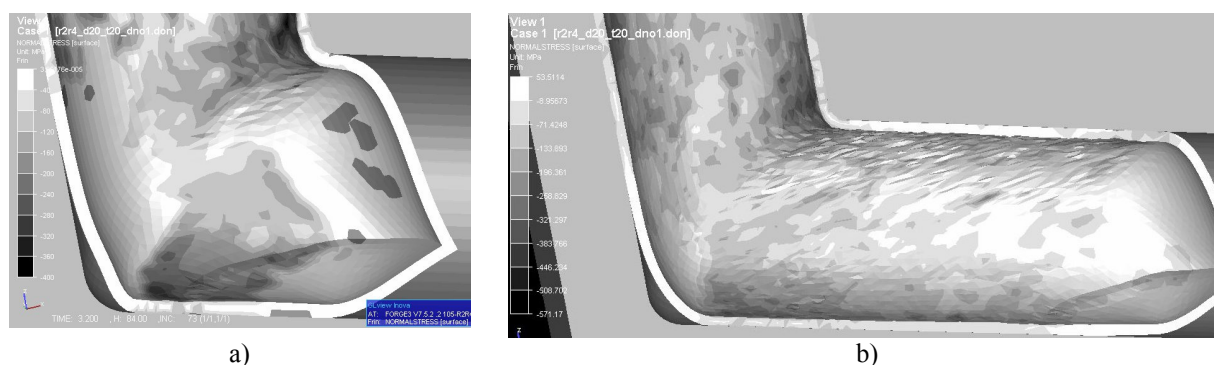


Рис. 3. Размещение нормальных напряжений на поверхности плакирующего слоя на начальном (неустановленном) а) и установленном б) этапе деформации в матрицы под углом $\varphi = 105^\circ$

На первом этапе можно наблюдать локальную концентрацию нормальных напряжений срезающих на поверхности плакирующего слоя (рис. 3а). Самые большие значения напряжений появляются при внутренней угловой части матрицы перед входом слоя в зону пластической деформации, зато при внешней угловой части матрицы, большая концентрация напряжений

выступает в месте контакта с дном горизонтального канала. Значения напряжений в этих зонах состоят около -300 МПа. В остальных местах стыка между слоями заготовки, появляются меньшие напряжения срезающие. В области внешней угловой части и головной части заготовки, слой расслаиваются, что является следствием

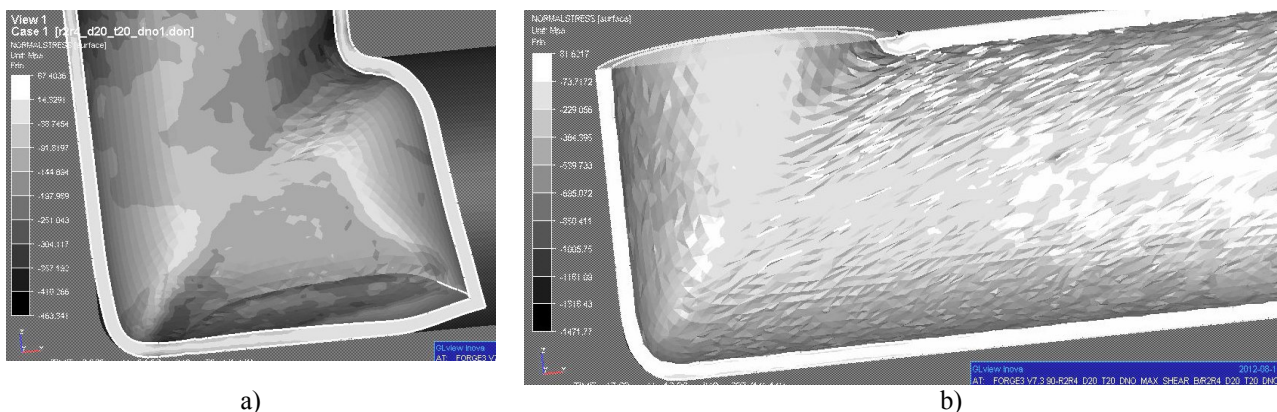


Рис. 4. Размещение нормальных напряжений на поверхности плакирующего слоя на начальном (неустановленном) а) и установленном б) этапе деформации в матрицы под углом $\varphi = 90^\circ$

присутствия плюсовых растягивающих напряжений (рис. 3а и рис. 2а).

В следующем этапе имеет место установленное течение слоев о локальных максимумах размещенных на тех же областях, но при

В матрицы $\varphi = 90^\circ$ необходимость оказывать большие силы выдавливания для деформации заготовки, приводит к лучшему выполнению внешней угловой части на первом этапе процесса (рис. 4 а). Самые большие напряжения на этом этапе выступают в тех же областях, что в матрицы $\varphi = 105^\circ$, максимальные значения достигают -450 МПа. На втором и третьем этапе выступает полное выполнение угловой части матрицы и однородность напряжений в горизонтальном канале, значения во время этих этапов увеличиваются до -1000 МПа (рис. 4б). Можно заметить, что нормальные напряжения в зоне внешней угловой части перед входом в зону пластической деформации имеют небольшие значения около -100 МПа а после входа биметалла в зону горизонтального канала, они подвергаются резкому сжатию и они достигают максимального значения, которое выступает от начала горизонтального канала до головной части образца. Зато в зоне внутренней угловой части

значительно увеличенных значениях. Максимальные значения составляют около -500 МПа на установленном этапе (рис. 3б), до -700 МПа на конечном этапе.

имеет место противоположная ситуация, перед входом в зону пластической деформации выступают максимальные напряжения сжимающее между слоями, а после входа слоя биметалла в горизонтальный канал эти напряжения уменьшаются, а даже изменяют знак на плюсовой, что может привести к расслоению.

Чтобы проверить характер течения слоев биметалла проведено лабораторные исследования. Процесс деформации проведено на горизонтальном гидравлическом прессе, при давлении 2,5 МН.

На рис. 7 представлено формы образцов после номерных и лабораторных исследований в установленном и конечном этапе процесса. Можно констатировать, что вследствие лабораторных исследований получено выжимки которых форма была похожа на форму модельного образца. Форма головной части указывает, что в модельных исследованиях применено соответствующее коэффициенты трения.

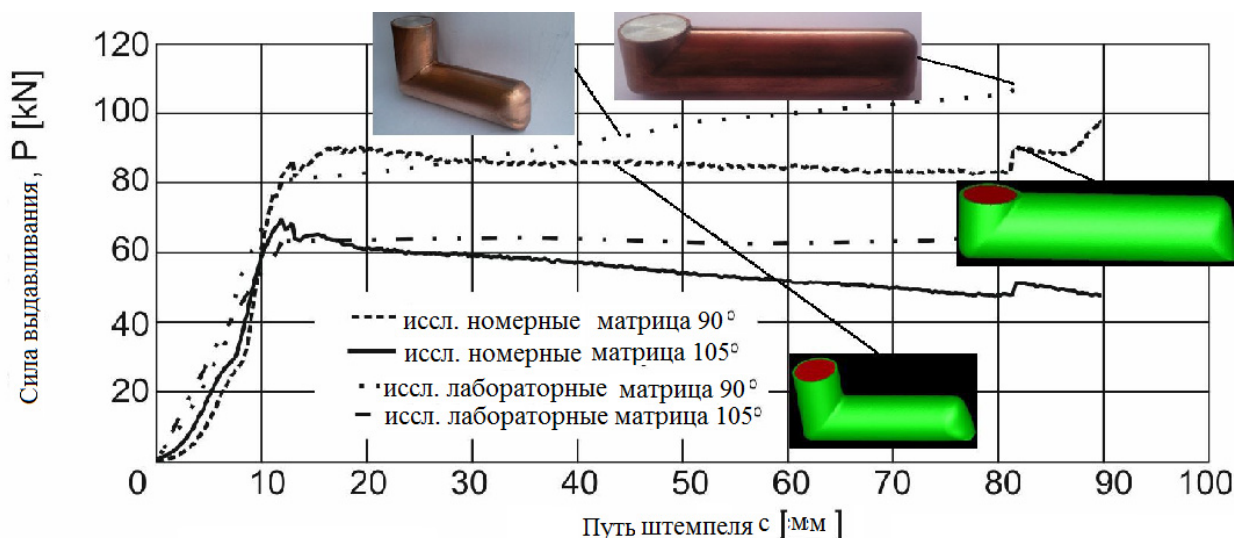


Рис. 7 График зависимости силы выдавливания от пути штемпея

Кроме того на рис. 7 представлено ход илы выдавливания в зависимости от штемпея во время номерных и лабораторных исследований. В первом неустановленном этапе процесса имеет место увеличение силы выдавливания, это вызвано приспособлением образца к каналу матрицы и уменьшается, это вызвано необходимостью преодолеть большое сопротивление деформации биметалла и увеличения доли сил трения в матрицы 90°. Зато в лабораторных исследованиях характер нагрузки на первом этапе очень похож, зато на этапе установленного течения выступает увеличение силы выдавливания в обоих случаях, что вероятно выступает по причине увеличения на этом этапе сил трения вытекающего из создания небольшого облоя (рис. 7) в плоскости деления матриц.

Подведение итогов

В работе исследовано влияние величины деформации на размещение напряжений и характер течения а также на ход максимальной силы давления, на основе проведенных исследований можно констатировать что:

1. В случае одинакового коэффициента трения между заготовкой и матрицей, при матрице $\varphi = 105^\circ$ появляется невыполнение внешней угловой части калибра матрицы, в этой зоне выступают недостаточные давления между слоями биметалла, что может в дальнейшем привести к расслоению.
2. В случае матрицы $\varphi = 90^\circ$ нормальные напряжения на грани слоев на аналогичных областях больше на 30% чем в случае матрицы $\varphi = 105^\circ$.
3. Несмотря на применение радиуса округлости внешней угловой части матрицы, прилегающий к нему плакирующий слой, после выхода из зоны пластической деформации подвергает значительному растягиванию, что может привести к разрушению раньше созданных мостиков соединяющих слои.

частичный вход обоих слоев биметалла в горизонтальный канал. На этом этапе, в номерных исследованиях, выступает максимальная сила. Во время установленного течения слоев, сила выдавливания в матрицы 90° является почти постоянной, зато для матрицы 105° резко 4. Применяя радиус округлости внешней угловой части матрицы $r=2$ мм не наблюдается сплющивания (овализация) поперечного сечения биметаллической заготовки в случае обеих исследуемых матриц, это значит, что заготовки можно применить во время следующей деформации.

Библиография

1. Kowalczyk L. „Łączenie metali w stanie stałym w procesach obróbki plastycznej” Wydawnictwo Naukowe –Techniczne, Warszawa 1988.
2. Eivani R., Karimi Taheri A. „A New method for producing bimetallic rods” Materials Letters 61 (2007) 4110-4113.
3. Zebardast M., Karimi Taheri A. „ The cold welding of copper to aluminum using equal channel angular extrusion (ECAE) process” Journal of Materials Processing Technology 211 (2011) 1034–1043.
4. Valiev R. Z., Islamgaliev R. K., Alexandrov I. V.: „Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation” Progres In Materials Science 45 (2000) 103-189.
5. Forge3® Reference Guide Release 6.2, Sophia-Antipolis, November 2002.